

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VYUŽITÍ SOLÁRNÍ ENERGIE PRO NAPÁJENÍ BEZDRÁTOVÝCH UZLŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RASTISLAV ČERVENÁK

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VYUŽITÍ SOLÁRNÍ ENERGIE PRO NAPÁJENÍ BEZDRÁTOVÝCH UZLŮ

SOLAR ENERGY IN WIRELESS SENSOR APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RASTISLAV ČERVENÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MILAN ŠIMEK, Ph.D.

BRNO 2012



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Rastislav Červenák

ID: 125395

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Využití solární energie pro napájení bezdrátových uzlů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je výzkum napájení IEEE 802.15.4 bezdrátových senzorů pomocí solární energie. Student dostane k dispozici vývojový kit od společnosti Texas Instruments na němž provede výzkum spotřeby elektrické energie při komunikaci bezdrátových zařízení. Student v práci podrobně nastuduje a analyzuje energetické nároky mikroprocesoru MSP430 a bezdrátového modulu eZ430. Dále provede měření dodávaného proudu solárním panelem při různých intenzitách osvětlení. Výstupem bakalářské práce bude sada měření, které student v bakalářské práci detailně popíše. Jedním z výstupů bude zobrazení závislosti počtu odeslaných paketů konstantní velikosti na vysílacím výkonu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Stojmenovic I., Handbook of Sensor Networks, Wiley, ISBN: 13 978-0-471-68472-5, 2005.
- [2] Swami A., Zhao Q., Hong Y., Tong L., Wireless Sensor Networks, Signal Processing and Communications Perspectives, ISBN: 978-0-0470-03557-3, 2007.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Milan Šimek, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práca tvorí zhrnutie problematiky zariadenia MSP430 eZ430-RF2500H. Zaoberá sa riešením spotreby jeho jednotlivých častí a problematikou napájania modulov pomocou solárnej energie. Výstupom je meranie intenzity signálu v závislosti na vzdialenosti bezdrôtových modulov a vysielačom výkone.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

bezdrôtové senzorové siete, intenzita signálu, spotreba, komunikácia, solárna energia

ABSTRACT

The work is a summary of the issues MSP430 devices eZ430-RF2500H. It deals with the solution to the consumption of its individual parts and the issue of power modules using solar energy. The output of the measurement signal depending on the distance of wireless modules and RF-power.

KEYWORDS

wireless sensor networks, signal strength, consumption, communication, solar energy

RASTISLAV, Červenák *Využití solární energie pro napájení bezdrátových uzlů*: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2011. 37 s. Vedúci práce bol Ing. Milan Šimek, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému „Využití solární energie pro napájení bezdrátových uzlů“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	9
1 Teoretický rozbor	10
1.1 Bezdrôtové senzorové siete a ich napájanie	10
1.1.1 Batérie	10
1.1.2 Získavanie energie z okolitého prostredia	13
1.1.3 Spotreba energie WSN	14
2 Hardware	16
2.1 Popis zariadenia eZ430-RF2500-SEH	16
2.1.1 Parametre napájacej časti zariadenia	16
2.1.2 Parametre Mikrokontroléru MSP430F2274	19
2.1.3 Parametre rádiového čipu CC2500	21
3 Software	24
4 Meranie	26
4.1 Meranie intenzity signálu v závislosti na vzdialenosti vysielачa a príj- mača	26
4.2 Meranie intenzity osvetlenia	29
4.3 Charakteristiky solárneho článku	30
4.3.1 Lux Voltová charakteristika pri zapojení naprázdno	30
4.3.2 Výkonová charakteristika pri zapojení so záťažou	32
4.4 Počet odoslaných paketov v závislosti na vysielacom výkone vysielачa	34
5 Záver	37
Literatúra	37

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Príklad topológie bezdrôtovej senzorovej siete	10
1.2	Charakteristika úschovy energie v batériach v závislosti na teplote [5]	12
1.3	Vybíjacia charakteristika Li-Ion batérie v závislosti na odoberanom náboji [5]	12
1.4	Prehľad spotreby rádiových vysieláčov pre WSN	15
2.1	eZ430-RF2500-SEH [1]	16
2.2	Blokový diagram zdroja energie	18
2.3	Vybíjacie charakteristiky EnerChips TM CBC050 [11]	18
2.4	Operačná charakteristika [2]	20
4.1	Závislosť dosahu signálu na vysielacom výkone v oblasti poľa	26
4.2	Vplyv polohy antény na dosah signálu	27
4.3	Náčrt merania dosahu signálu pre rôzne vysielacie výkony	28
4.4	Dosiahnutá vzdialenosť pre rôzne vysielacie výkony	28
4.5	Závislosť dosahu signálu na vysielacom výkone	29
4.6	Intenzita osvetlenia v rôznych častiach budovy a vonku	30
4.7	Fotka z merania	31
4.8	Lux Voltová charakteristika solárneho článku v zapojení bez záťaže	31
4.9	Schéma zapojenia merania Lux-Voltovej charakteristiky solárneho modulu v zapojení bez záťaže	32
4.10	Výkonová charakteristika solárneho článku pre $509\ \Omega$	33
4.11	Výkonová charakteristika solárneho článku pre ďalšie rezistivity	33
4.12	Schéma zapojenia merania výkonovej charakteristiky solárneho modulu so záťažou	34
4.13	Počet odoslaných paketov pre rôzne vysielacie výkony	36

ZOZNAM TABULIEK

1.1	Typická kapacita batérií v závislosti na ich veľkosti [4]	11
1.2	Porovnanie vlastností batérií s tekutým elektrolytom a Solid-State	13
1.3	Odhadovaná úroveň dostupnej energie z okolia pre štyri druhy zdrojov	14
1.4	Prehľad výkonu súčasných nízko-výkonových solárnych článkov [8] [9] [10]	14
2.1	Operačné charakteristiky napájacej časti [1]	17
2.2	Doporučené prevádzkové podmienky	19
2.3	Citlivosť prijímača v závislosti rýchlosti prenosu dát	22
2.4	Parametre rádiového čipu CC2500	23
4.1	Čas možného odosielania paketov pre jednotlivé vysielacie výkony	35
4.2	Výpočet možného počtu odoslaných paketov	36

ÚVOD

V súčasnosti existujú dve hlavné cesty k zvýšeniu výdrže bezdrôtových senzorových sietí (Wireless Sensor Network - WSN). Prvá z nich je znižovanie spotreby bezdrôtových uzlov, a to pomocou nízko-energetických čipov a efektívnych algoritmov. Druhou cestou je získavanie energie z okolitého prostredia a jej ukladanie. Veľmi perspektívne sa ukazuje získavanie solárnej energie pomocou solárnych článkov. Moderné solárne panely dodávajú dostatok energie už aj pri nižších hodnotách intenzity osvetlenia.

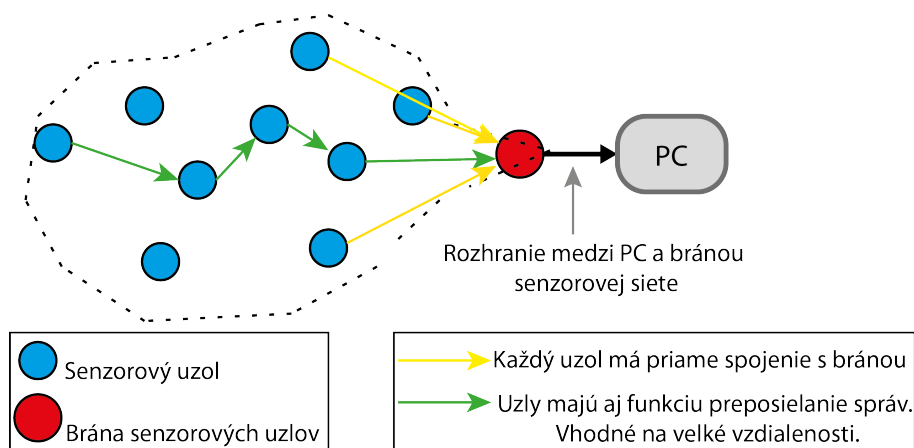
1 TEORETICKÝ ROZBOR

1.1 Bezdrôtové senzorové siete a ich napájanie

Bakalárska práca je venovaná problému napájaniu bezdrôtových senzorových sietí (ďalej WSN).

WSN sa skladajú z distribuovaných senzorov, ktoré monitorujú rôzne dáta, ako sú teplota, zvuk, vibrácie, tlak, a pod. Získané dáta predávajú prostredníctvom siete prístupovému bodu, ktorý ich spracuje a pošle do klientskej stanice.

Siete môžu mať jednosmerný alebo obojsmerný prenos. Obojsmerné umožňujú ovládať činnosť senzorov. Kde takáto komunikácia nie je možná je náročnejšia úprava vlastností senzorov, pretože každý tento senzor potrebuje pre preprogramovanie ich fyzické pripojenie k programátoru. To môže byť v niektorých prípadoch náročné a zdĺhavé.



Obr. 1.1: Príklad topológie bezdrôtovej senzorovej siete

WSN sa môže skladať z niekoľko málo až tisícov uzlov. Každý takýto sieťový uzol obsahuje rádiový vysielač s vlastnou, prípadne externou anténou, ďalej mikrokontrolér, elektronický obvod pre pripojenie so senzormi a zdroj energie.

1.1.1 Batérie

Kapacita batérií

Prakticky je väčšina WSN systémov založených na energii z batérií. Preto je nutné získať z nich čo možno najviac energie na čo najmenšej ploche, a to pomocou najnovších batériových technológií Lead Acid, Ni-Cd, Nickel-Metal Hybride, Lithium Ion a najnovšie Solid-State. Ich limitom je ich kapacita, samovybíjanie a životnosť. V tabuľke č. 1.1 je uvedená typická kapacita batérií v závislosti na ich veľkosti. Pre

dobíjateľné batérie je menovité napätie 1,2V. V nabitom stave 1,35V a vo vybitom má článok od 0,8V až 1V. Kapacitu batérie vyjadríme v Ampér-hodinách. 1 Ah je definovaná ako náboj, ktorý akumulátor dodá do obvodu pri konštatnom prúde 1 ampér za dobu 1 hodinu.

$$1 \text{ Ampér} = 1 \text{ Coulumb za 1 sekundu (C/s)}$$

$$1 \text{ Hodina} = 3600 \text{ sekúnd}$$

$$1 \text{ Ah} = 1 \text{ Ampér} \times \text{hodina} = 1 \text{ C/s} \times 3600\text{s} = 3600\text{C}.$$

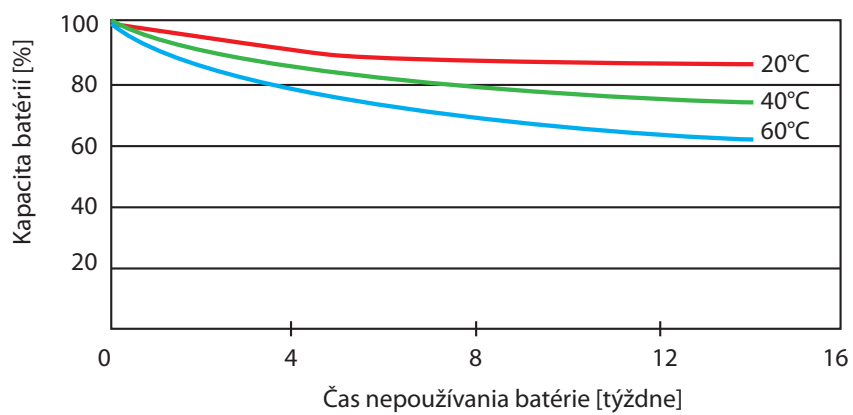
Tab. 1.1: Typická kapacita batérií v závislosti na ich veľkosti [4]

Veľkosť článku	Typická kapacita v mAh
AAA	700
AA	1500-2000
9V	500

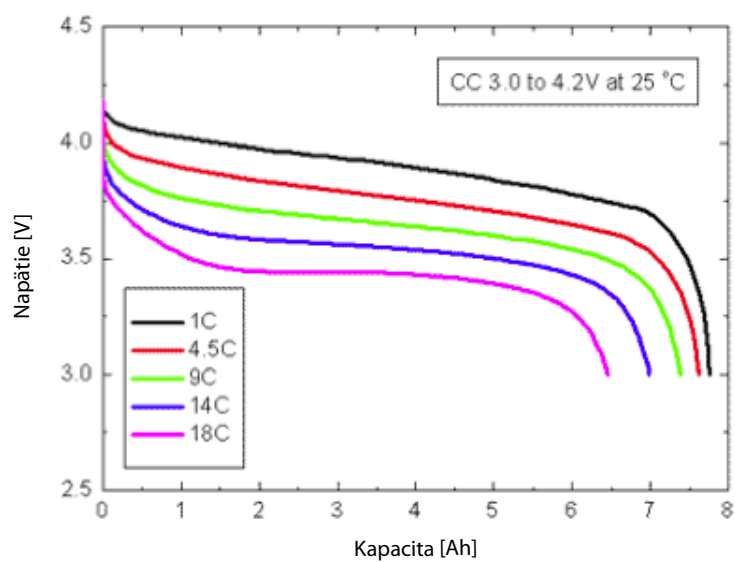
Dôležitým faktorom ktorý vplýva na charakteristiku batérií je okolitá teplota. Pri znížení teploty NiCD alebo NiMh článkov na 0°C poklesne kapacita asi na 80-90%. Pri ďalšom znižovaní kapacity je pokles ešte výraznejší. Tento process je ale vratný so zvyšujúcou sa teplotou. Podobný pokles nastáva ale aj pri vysokej teplote. Pri náraste teploty NiMH článku na 50°C klesá kapacita približne ako pri bode mrazu. Pri vyšších teplotách hrozí aj nebezpečenstvo nevratného zníženia kapacity až celkové zničenie baterií nevratným zvýšením vnútorného odporu, alebo naopak jeho prudkým znížením takmer na nulu (vnútorný skrat). Články, ktoré sú v prostredí pri teplote 40°C majú skrátenú životnosť približne o polovicu, pri 60°C dokonca na desatinu. Nabíjanie pri nižších teplotách nebýva problém, pretože sa článok samotným nabíjaním mierne zahrieva. Problém ale nastáva pri vyšších okolitých teplotách (v lete, v prehriatej miestnosti, v blízkosti vyhrievacích telies, na priamom slnku), pretože k teplote okolitého vzduchu sa pripočítava ešte teplota samotným ohrevom počas nabíjania.

Vybíjanie batérií

Batérie sa vybíjajú aktívnym čerpaním energie z nich a samovybíjaním. Samovybíjanie batérie je jav, pri ktorom sa znižuje kapacita batérie bez toho, aby sa z nej spotrebovávala energia. Samovybíjacia charakteristika článku určuje ako rýchlo sa článok vybije pri nepoužívaní. Rýchlosť samovybíjania článku je závislá na chemickom zložení článku a okolitej teplote (obrázok č. 1.2). Množstvo nežiadúcich chemických reakcií v batérií, ktoré spôsobujú úniky prúdu medzi katódou a anódou sa zvyšujú so zvyšujúcou sa teplotou.



Obr. 1.2: Charakteristika úschovy energie v batériach v závislosti na teplote [5]



Obr. 1.3: Vybíjacia charakteristika Li-Ion batérie v závislosti na odoberanom náboji [5]

Vplyv na efektívnu kapacitu batérie má veľkosť odberu náboja z nej (obrázok č. 1.3). Čím väčší náboj odoberáme, tým je nižšia efektívna kapacita. Teda čím väčší prúd odoberáme z batérie, tým menej energie z nej získame.

Solid-state batérie

V súčasnosti má najvyššiu hustotu energie Li-Ion. Ich problém ale je ich ekologickosť, relatívne krátky životný cyklus a malá hustota energie. Ako alternatíva sa v posledných rokoch využíva polovodič, pevný elektrolyt (solid-state), tiež nazývané tenkovrstvové batérie. Ich typická kapacita je 0,02 až 0,15 mAh na cm². Celková kapacita potom býva 1 až 2 mAh. Technológia Solid-State umožňuje použitie vyššieho napätia na katódach. Majú nižšie hodnoty samovybíjania ako batérie s tekutým elektrolytom a tak umožňujú dlhodobé (rádovo v rokoch) uchovanie energie s minimálnou stratou. Dosahujú 10 až 100 krát viac cyklov nabíjania/vybíjania bez výrazného znižovania kapacity. Sú stabilné aj pri vysokej teplote a umožňujú prevádzku v širokom rozsahu teplôt (-20°C až 70°C). [6]

Tab. 1.2: Porovnanie vlastností batérií s tekutým elektrolytom a Solid-State

Tekuté batérie	Solid-state batérie
Lacné spracovanie	Drahé spracovanie
Vysoký elektrický odpor	Keramický oddelovač - náchylné na mechanické namáhanie
Mechanické namáhanie	Nižšia kapacita
Vyššia iónová vodivosť pri izbovej teplote	Iónová vodivosť pre širší rozsah teplôt
Horľavý elektrolyt	Vysoký elektrický odpor
Kratšia doba živostnosti	Nehorľavý elektrolyt
Reakcie v elektrolyte obmedzuje limit katódových materiálov	Dlhší životný cyklus
Zlá tepelná stabilita	Vysoké napätie na katódach
Samovybíjanie obmedzuje životnosť	Výrazne nižšie samovybíjanie
Citlivé na prebíjanie	Vyššia hustota energie

1.1.2 Získavanie energie z okolitého prostredia

Aby nebolo nutné batérie vymeniat je nutné zabezpečiť ich samostatné dobíjanie. Na to je možné využiť niektorý z nasledujúcich fyzikálnych princípov premeny energie z: teplotného rozdielu, vibrácií, svetla a energie z rádiových frekvencií (RF). V tabuľke č. 1.3 je zobrazený odhad úrovne energie, ktorú môžeme získať zo spomínaných zdrojov energie.[7]

Tab. 1.3: Odhadovaná úroveň dostupnej energie z okolia pre štyri druhy zdrojov

Zdroj energie	Zachytená energia
Vibrácie	
Človek	4 μ W/cm ²
Priemysel	100 μ W/cm ²
Teplotný rozdiel	
Človek	25 μ W/cm ²
Priemysel	1-10mW/cm ²
Svetlo	
Budova	10 μ W/cm ²
Vonkajšie prostredie	10mW/cm ²
RF Energia	
GSM	0,1 μ W/cm ²
Wi-Fi	1 μ W/cm ²

Svetlo dokáže dodávať dostatočnú energiu pre napájanie WSN modulu. Je ale nutné umiestnenie s dostatočným osvetlením. Pri návrhu riešenia týmto spôsobom je potreba brať v úvahu región, v ktorom budú solárne články umiestnené a rovnako aj samotnú polohu článkov (obytný priestor, les, strecha). Solárne články je možné vyrábať v dvoch prevedeniach, a to ako kryštalickej silikón a tenký film. Prvý dosahuje účinnosti 10% až 20%, oproti druhému, ktorý má účinnosť 3% až 5%, je ale menej mechanicky odolný. Dnešné solárne články dodávajú výkon od μ W do MW. Závisí to od plochy solárneho článku a jeho účinnosti. Prehľad solárnych článkov vhodných pre WSN siete je uvedený v tabuľke č. 1.4. Už pri intenzite svetla 200 luxov, čo odpovedá osvetleniu v miestnosti, sú schopné dodávať výkon 140 μ W.

Tab. 1.4: Prehľad výkonu súčasných nízko-výkonových solárnych článkov [8] [9] [10]

Solárny článok	Výstupné napätie [V]	Intenzita svetla [Lux]	Výstupný prúd	Výkon	Rozmer [cm ²]	Výkon na 1cm ²
AM-1473	1,5	200	8 μ A	12 μ W	3,5	3,44 μ W
AM-1815	3	200	42 μ A	126 μ W	29,95	4,67 μ W
AM-5308	1,7	50000	31,1mA	52,87mW	23,64	2,23mW

1.1.3 Spotreba energie WSN

Spotreba energie WSN je kľúčovým prvkom pre zabezpečenie funkčnosti siete aj v miestach, kde je získavanie energie náročné a nie stále. Preto je potrebné zabezpečiť čo najnižšiu spotrebu celého uzlu, a to hlavne mikrokontroléru a rádiového

vysielača. Výber vhodného nízko-energetického hardwaru je však iba časť riešenia problému. Ďalším faktorom je program, ktorý riadi celý uzol. Najst efektívny algoritmus pre zachovanie funkčnosti siete je veľmi náročné. Riešiť sa musia režimy spánku uzlu, frekvencia vysielania, protokol, veľkosť paketov a celková výpočtová náročnosť algoritmu na mikrokontrolér. Spotreba rádiových čipov určených pre WSN siete je uvedená v tabuľke č. 1.4. Vysielač má najvyššiu spotrebu z celého uzlu. Spotrebováva o rád viac energie ako dodávajú bežné solárne články.

Obr. 1.4: Prehľad spotreby rádiových vysielačov pre WSN

Radio	Výrobca	Spotreba energie	
		Vysielanie	Príjem
AT86RF230	Atmel	27 mW (1 dBm)	28 mW
AT86RF212	Atmel	23 mW (0 dBm)	17 mW
CC2420	Texas Instrumets	37 mW (0 dBm)	39 mW
CC1000	Texas Instrumets	41 mW (0 dBm)	29 mW
TR1000	RF Monolithics	36 mW (0 dBm)	9 mW
JN-DS-JN513x	Jennic	111 mW (1 dBm)	111 mW

Na veľkosť spotrebovanej energie má vplyv veľkosť paketu, ktorý vysielame. Táto energia je potom rovná

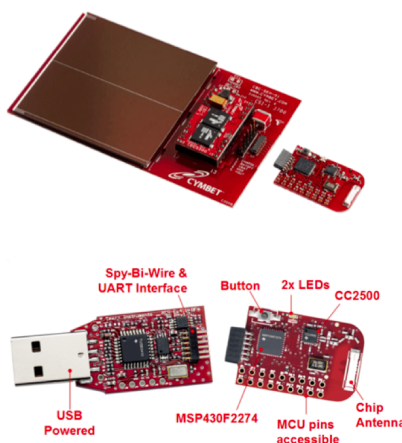
$$\text{Energia} = \text{Energia na 1 paket} \times \text{Počet paketov} + \text{Spotreba vysielača} \quad (1.1)$$

2 HARDWARE

Bakalárska práca je spracovaná na základe riešenia od firmy Texas Instruments – MSP430 eZ430-RF2500-SEH. Jeho popis je uvedený nižšie.

2.1 Popis zariadenia eZ430-RF2500-SEH

eZ430-RF2500-SEH je zariadenie napájané pomocou solárnej energie. Jedná sa o bezdrôtovú senzorovú sieť založenú na veľmi nízkej spotrebe mikrokontroléru MSP430. Bezdrôtový vysielateľ CC2500 pracuje v nelicencovanom pásme 2,4 GHz.



Obr. 2.1: eZ430-RF2500-SEH [1]

Solárny článok (5,715 cm x 5,715 cm) dosahuje vysokej efektivity. Je optimalizovaný pre vnútorné použitie pri nízkej intenzite osvetlenia. Dodávaná solárna energia je dostatočná pre spustenie aplikácií bezdrôtových senzorov bez prídavnej energie. Modul má vstupy aj pre pripojenie externej energie, ako sú napríklad piezoelektrické články alebo aj iný solárny panel.

Modul je možné pripojiť do USB rozhrania pomocou priloženého prevodníku a vďaka nemu programovať jednotlivé moduly. V konfigurácii „prístupový bod“ môže prijímať dáta z ostatných modulov a tie následne spracovávať v aplikácii klientskej stanice. Modul obsahuje integrovaný teplomer, merač intezity signálu a je k nemu možné pripájať ďalšie externé senzory.[1]

2.1.1 Parametre napájacej časti zariadenia

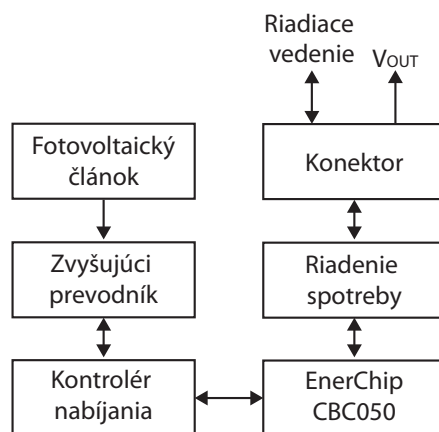
V tabuľke 2.1 sú uvedené parametre solárneho článku a batérie, ktoré tvoria napájaciu časť modulu eZ430-RF2500-SEH[1]. Solárny článok potrebuje pre svoju

činnosť minimálne 200 luxov. Pri týchto svetelných podmienkach panel dodáva výkon $80 \mu\text{W}$. Od 700 luxov článok nabíja batériu a pri 1000 luxoch dodáva $350 \mu\text{W}$. Pri nižších svetelných podmienkach ako je 200 luxov je zariadenie napájané batériami.

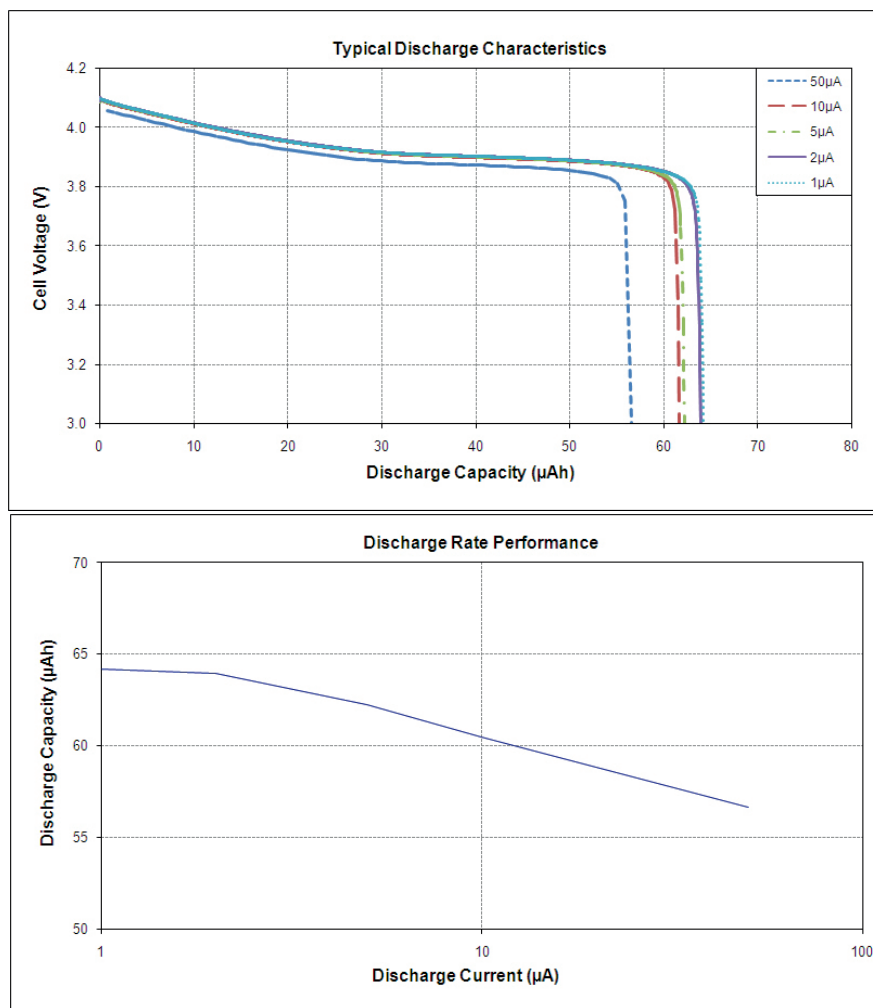
Tab. 2.1: Operačné charakteristiky napájacej časti [1]

Parameter	Stav	MIN	TYP	MAX	Jednotka
Intenzita osvetlenia	Minimum pre vykonávanie základných operácií	200			lux
	Nabíjanie	700			lux
Priemerný výstupný výkon	1000 lux (FL), batéria nie je nabíjaná		350		μW
	200 lux (FL), batéria nie je nabíjaná		80		μW
Výstupné napätie	2- μA load, Nabíjanie batérie	3,5	3,55	3,6	V
VBAT nabíjacie napätie			4,06		V
Odpájacie napätie batérie		3	3,3	3,6	V
Operačná teplota		0	25	70	$^{\circ}\text{C}$
Nabíjací čas (do 80% z kapacity)	4.1-V constant voltage	500			min
Kapacita	8- μA vybíjací prúd; 25°C		100		μAh

Systém riadi a ukladá ďalšiu energiu pomocou EnerChips™ EH CBC5300 (obrázok č. 2.2), ktorý obsahuje zároveň dvojicu dobíjacích batérií EnerChips™ CBC050. Kapacita každej z nich je $50 \mu\text{Ah}$ pri výstupnom napätí 3,8V. Slúžia na udržanie aktivity modulu aj v prípade nedostatku svetelnej energie. Počet nabíjacích cyklov sa odhaduje na 5000. Batérie sú vyrobené technológiou Solid-State, ktorá je popísaná v kapitole 1. Majú veľmi nízke samovybíjanie, čo je dôležité pri aplikáciach s nízkym ziskom energie. Na obrázku č. 2.3 je zobrazená vybíjacia charakteristika batérie EnerChips™CBC050. Aj tu ovplyvňuje veľkosť odoberaného prúdu veľkosť efektívnej kapacity batérie. Napätie na batérii výrazne klesne až po dosiahnutí úrovne nízkej kapacity.



Obr. 2.2: Blokový diagram zdroja energie



Obr. 2.3: Vybíjacie charakteristiky EnerChips™ CBC050 [11]

2.1.2 Parametre Mikrokontroléru MSP430F2274

Texas Instruments MSP430F2274 je mikrokontrolér z rady nízko-výkonových. Architektúra s piatimi režimami nízkej spotreby je optimalizovaná pre dosiahnutie dlhšej životnosti batérie v prenosných meracích aplikáciách. Je vybavený výkonným 16-bitovým RISC procesorom, 16-bitovými registrami a konštantnými generátormi, ktoré prispievajú k maximálnej efektívnosti kódu. Digitálne riadené oscilátory (DCO) umožňujú prebúdzanie z režimu nízkej spotreby do aktívneho režimu za menej ako 1 ms.

Funkcie

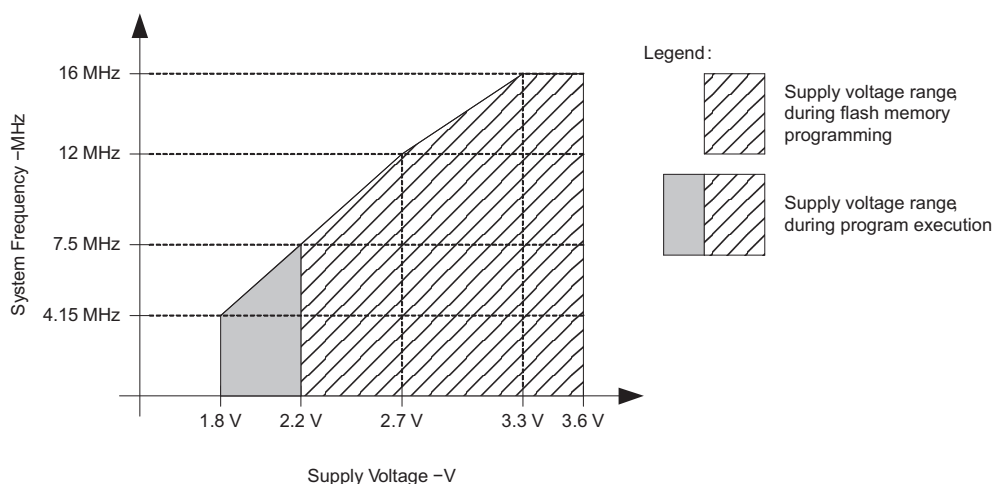
- Ultra-nízka spotreba energie
 - Aktívny mód: $270\ \mu\text{A}$ pri 1 MHz, 2,2 V
 - Režim spánku: $0,7\ \mu\text{A}$
 - Off mód (Udržiavanie pamäti RAM): $0,1\ \mu\text{A}$
- Prebudenie zo stavu spánku za menej ako $1\ \mu\text{s}$
- Univerzálne sériové komunikačné rozhranie
 - Rožšírená podpora UART
 - Automatické rozpoznanie rýchlosti prenosu dát
 - IrDA kóder a dekóder
- Pamäť Flash: 32 kB
- Pamäť SDRAM: 1 kB

V tabuľke 2.1.2 sú uvedené ďalšie vlastnosti mikrokontroléru.

Tab. 2.2: Doporučené prevádzkové podmienky

			MIN	NOM	MAX	Jednotka
V _{CC}	Napájacie napätie	Počas vykonávania programu	1,8		3,6	V
		Počas zapisu/vymazania flash pamäti	2,2		3,6	
V _{SS}	Napájacie napätie		0			V
f _{SYSTEM}	Frekvencia procesoru	V _{CC} = 1,8V, pracovný cyklus = 50%±10%	dc		4,15	MHz
		V _{CC} = 2,7V, pracovný cyklus = 50%±10%	dc		12	
		V _{CC} = 3,3V, pracovný cyklus = 50%±10%	dc		16	

Prevádzkové charakteristiky mikrokotroléra vyjadrujú jeho vlastnosti pre rôzne prevádzkové podmienky. Mikrokotrolér MSP430F2274 pracuje na 4 rôznych frekvenciách (4,15 MHz až 16 MHz). Mikrokotrolér môže pracovať pri spracovávaní programu už pri frekvencii 4,15 MHz, teda pri napätí 1,8V. Pri zápise a mazaní programu do pamati mikrokotroléra je nutná vyššia frekvencia, minimálne 7,5 MHz a teda aj vyššie napätie 2,2 V.



Obr. 2.4: Operačná charakteristika [2]

Operačné módy

Mikrokotrolér MSP430 obsahuje niekoľko režimov v ktorých môže pracovať a prepínať sa medzi nimi podľa aktuálnej potreby. Celkovo šesť módov je rozdelených na jeden aktívny mód a päť nízko-energetických módov, ktoré sa dajú programovo meniť. Z každého nízko-energetického módu sa dá zobudiť, obslúžiť aktuálnu požiadavku a vrátiť sa späť do pôvodného režimu.[2]

ACKL - pomocné hodiny, riadenie z 32768HZ kryštálu

MCLK - hlavné hodiny - systémové hodiny používané CPU

SMCLK - Sub-Main hodiny používané perifériami

1. Aktívny režim
 - Všetky hodiny sú aktívne
2. Nízko-napäťový režim 0
 - CPU je odpojený
 - ACLK a SMCLK ostávajú aktívne. MCLK je odpojený
3. Nízko-napäťový režim 1
 - CPU je odpojený

- ACLK a SMCLK ostávajú aktívne. MCLK je odpojený
 - DCO je odpojený ak DCO nie je používané v aktívnom režime
4. Nízko-napäťový režim 2
 - CPU, MCLK a SMCLK sú odpojené
 - DCO a ACLK zostáva povolený
 5. Nízko-napäťový režim 3
 - CPU, MCLK a SMCLK sú odpojené
 - DCO je povolený
 - ALK ostáva aktívny
 6. Nízko-napäťový režim 4
 - CPU, ACLK, MCLK, SMCLK, DCO sú odpojené
 - Kryštálový oscilátor je zastavený

2.1.3 Parametre rádiového čipu CC2500

Vysielač CC2500 je z rady nízko-energetických 2,4GHz RF vysielačov. Je preto určený pre nízko napäťové bezdrôtové aplikácie. Pracuje v rovnakom pásme ako Wi Fi v rozsahu 2400MHz až 2483,5MHz. Počet možných kanálov je 400, teda vysielanie je možné nastaviť pre frekvencie každých $2400\text{kHz} + (n \times 200\text{kHz})$ kde n je kanál na ktorom chceme vysieľať. Vysielač RF je integrovaný s konfigurovateľným modemom. Modem podporuje rôzne formáty pre modulácie a má nastaviteľný dátový tok až do 500 kBaud.

CC2500 poskytuje hardwarovú podporu pre spracovanie paketov, obsahuje vyrovnávaciu pamäť a podporuje burst prenosy, technológiu Clear Channel na hodnotenie kvality spojenia a Wake-on-radio.

Funkcie

- RF Výkon
 - Citlivosť -104 dBm na 2,4 kBaud
 - Programovateľný vyžiarovaný výkon do +1dBm
 - Programovateľná dátová priepusnosť od 1,2 do 500 kBaud
 - Frekvenčný rozsah 2400–2483,5 MHz
- Analógové vlastnosti
 - Podporované modúlácie OOK, 2-FSK, GFSK a MSK
 - Frekvenčné prepínanie a multi-kanálové systémy
 - Automatická frekvenčná kompenzácia
 - Integrovaný analógový teplotný senzor

Citlivosť prijímača sa dá nastaviť podľa rýchlosti prenosu dát a to podľa tabuľky č. 2.3.

Tab. 2.3: Citlivosť prijímača v závislosti rýchlosti prenosu dát

Rýchlosť prenosu dát	Citlivosť prijímača
[kBaud]	[dBm]
2,4	104
10	-99
250	-89
500	-83

V tabuľke č. 2.4 je zobrazený prehľad možností nastavenia vysielača a prijímača rádiového čipu CC2500. Ten podporuje 4 druhy modulácie, a to 2-FSK, QFSK, OOK a QPSK. Prijímaciu časť je možné nastaviť do 10 rôznych režimov. Závislosť spotreby energie je potom určená citlivosťou a rýchlosťou prenosu dát. V režime vysielača podporuje rádiový čip celkovo 17 režimov. Spotreba energie je závislá na veľkosti výstupného výkonu vysielača.

Tab. 2.4: Parametre rádiového čipu CC2500

Parameter	MIN	TYP	MAX	Jednotka	Poznámka	
Napájacie napätie	1,8		3,6	V		
Frekvenčný rozsah	2400		2483,5	MHz		
Prenos dát	1,2		500	kBaud	2-FSK	
	1,2		250		GFSK a OOK	
	1,2		500		QPSK, optimálne kódovanie Manchester	
Elektrická špecifikácia						
Spotreba prúdu v režime príjmu		17		mA	2,4 kBaud vstupná citlivosť na hranici	
		14,5			2,4 kBaud vstupná citlivosť vysoko nad hranicou	
		17,3			10 kBaud vstupná citlivosť na hranici	
		14,9			10 kBaud vstupná citlivosť vysoko nad hranicou	
		18,8			250 kBaud vstupná citlivosť na hranici	
		15,7			250 kBaud vstupná citlivosť vysoko nad hranicou	
		16,6			250 kBaud optimalizovaný prúdový odber, vstupná citlivosť na hranici	
		13,3			250 kBaud optimalizovaný prúdový odber, vstupná citlivosť vysoko nad hranicou	
		19,6			500 kBaud limitovaná citlivosť	
		17			500 kBaud vysoko nad hranicou citlivosti	
Spotreba prúdu v režime vysielania		9,9		mA	-30 dBm	výstupný výkon
		9,7			-28 dBm	
		10,2			-26 dBm	
		10,1			-24 dBm	
		10			-22 dBm	
		10,1			-20 dBm	
		11,7			-18 dBm	
		10,8			-16 dBm	
		12,2			-14 dBm	
		11,1			-12 dBm	
		12,2			-10 dBm	
		14,1			-8 dBm	
		15			-6 dBm	
		16,2			-4 dBm	
		17,7			-2 dBm	
		21,2			0 dBm	
		21,5			+1 dBm	

3 SOFTWARE

Pomocou dodávaného firmware je možné nakonfigurovať výkon vysielача a prijímača, použitý protokol na prenos správ, výber prenosového kanálu, frekvenciu odosielania dát, formát dát a kalibráciu prijatých dát.

Pre účely bakalárskej práce bolo nutné spraviť zmeny, a to úpravu vysielacieho výkonu vysielача a zmeniť obmedzenie vysielania paketov z batérie zo 400 na dostatočne veľký počet pre účely merania. Zmenený bol aj čas vysielania na 1 sekundu, aby sa skrátila doba merania.

V prvej časti sa definuje odpočítavadlo pre čas medzi vysielaniami

```
#define sec1      1500           // ~1 sec
#define sec2      2610
#define sec5      7500           // ~5 sec  (=7500/(12000/8))
#define sec10     15000          // ~10 sec
#define sec20     30000          // ~20 swec
#define sec40     60000          // ~40 sec
#define sec30_2    43000         // ~30sec 2 min
#define sec30_4    50434         // ~30sec 4 min
#define one_hour   5400000
```

V nasledujúcej časti je uvedená štandardná konfigurácia parametrov od výrobcu. Udáva aplikáci správanie sa pri vysielaní bez dostatočného osvetlenia, teda pri vysielaní z batérie bez jej nabíjania. Ak klesne napätie na batérii pod 2,9V, alebo sa odošle 400 paketov, vysielanie sa ukončí. Aby bola zabezpečená ochrana batérii pred celkovým vybitím, bola upravená iba druhá hodnota na hodnotu 9999 paketov. Vyššia hodnota nebola potrebná a zároveň by sa musel zmeniť formát odosielaného paketu.

```
#define run_voltage 29 // Minimálne napätie pre vykonávanie cyklu 2,9V
#define xmt_count 400 // # maximálny počet prenosov na batériu - 400
```

Formát dát, ktoré sa prenášajú

```
/* message format , UB = upper Byte , LB = lower Byte
|degC LB | degC UB | volt LB | Mode | # transmit LB |# transmit UB | ? |
0         1         2         3         4         5         6
*/
msg[0] = teplota (nizky bajt)
msg[1] = teplota (vysoky bajt)
msg[2] = dodavane napätie
msg[3] = mód napájania
msg[4] = počet zostávajúcich prenosov (nizky bajt)
msg[5] = počet zostávajúcich prenosov (vysoky bajt)
%msg[6] = indikuje stav zapnutia/vypnutia
```


Prijatá správa

```
char output_verbose[] =  
// pozícia v poli output_verbose[:  
//0          10          20          30          40          50          60  
//012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012  
{ '\r\nNode:XXXX,Temp:-XX.XC,Battery:X.XV,Strength:XXX,RE:XXXXXXX' };
```

Za X sa vkladajú priaté správy, a to buď priamo, alebo sa prepočítajú. Týmto spôsobom sa dá kalibrovať napríklad prijatá informácia o teplote.

Ukázková správa:

Node:0001,Temp: 84.7F,Battery:3.3V,Strength:034%,RE:1051399

V súbore `mrfiradio.c` je uložená informácia o vysielacom výkone vysieláča.

```
#define MRFI_SETTING_PATABLE0 0xFE
```

Zmena sa robí zmenou hodnoty 0xFE v registru PATABLE na hodnotu priradenú k požadovanému vysielaciemu výkonu podľa tabuľky uvedenej v manuáli k rádiovému vysieláču CC2500 [3].

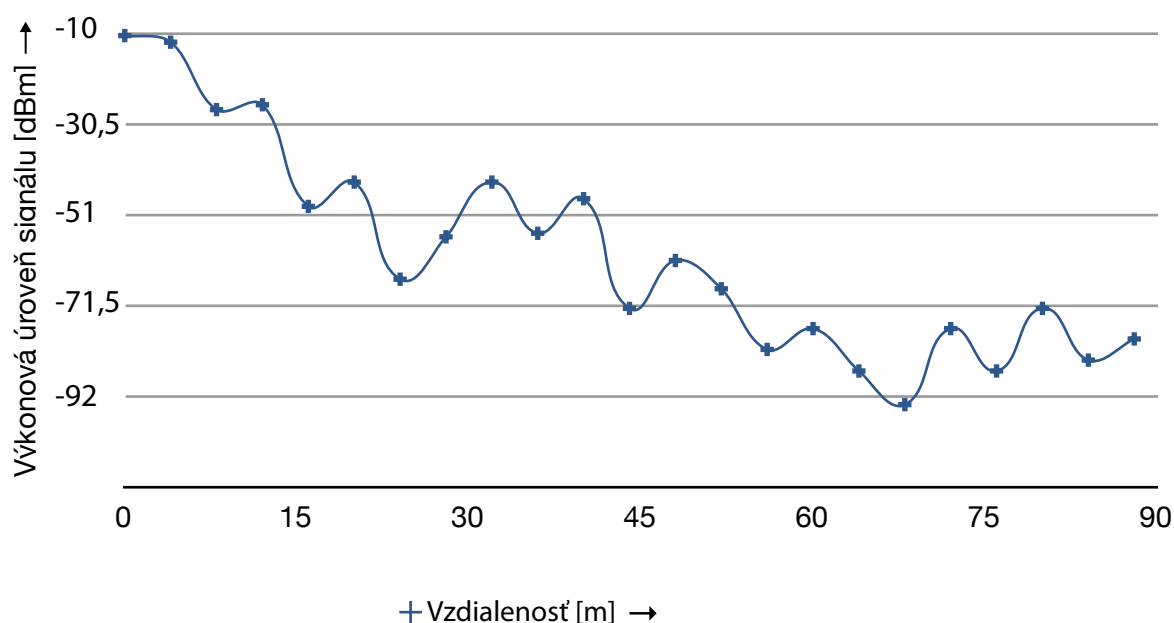
4 MERANIE

Nasledujúce merania boli urobené na zistenie reálnych vlastností zariadenia eZ430-RF2500-SEH na základe ktorých je možné navrhnúť konkrétne riešenie pre vybrané účely.

4.1 Meranie intenzity signálu v závislosti na vzdialenosti vysielачa a príjmača

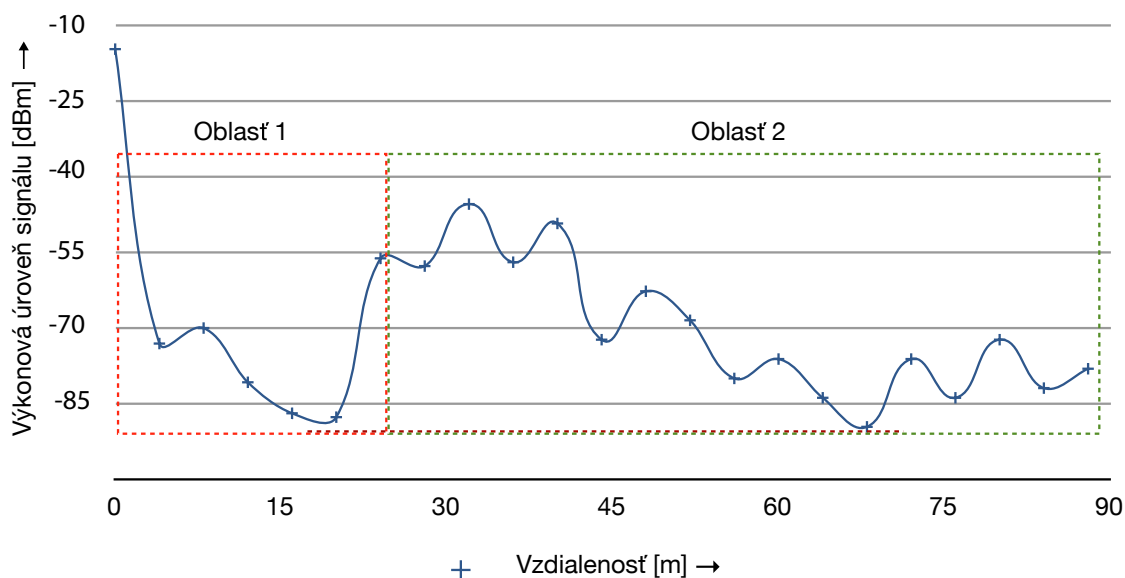
Aby bolo možné zaistiť dostatočnú kvalitu signálu v závislosti na vzdialenosti, je možné nastaviť v rádiovom vysielачi jeho výkon. Ten má ale vplyv na spotrebu energie. Preto je vhodné zistiť vzdialenosť na akú chceme vysielач a prostredie v akom budú moduly pracovať.

Meranie intenzity signálu bolo prevedené na dvoch rôznych miestach. Počas všetkých meraní bola nastavená citlivosť príjmača na -89 dBm. Prvým bolo voľné priestranstvo uprostred poľnohospodárskeho pola. Na tomto mieste nedochádzalo k odrazu signálu od okolitých stromov, budov ani stien. Na tomto mieste sa pomocou antén v notebooku nepodarilo zachytiť žiaden signál Wi-Fi. Výkon vysielачa bol nastavený na vysielací výkon 0 dBm. Zariadenia so sebou komunikovali do vzdialenosti 88 m. Priebeh merania je zobrazený v grafe na obrázku č. 4.1



Obr. 4.1: Závislosť dosahu signálu na vysielacom výkone v oblasti poľa

Obrázok č. 4.2 zobrazuje výsledok prvého merania v tomto prostredí. Je rozdelený na oblasť 1 a 2. V oblasti 1 bola prijímacia anténa nízko pri zemi, a to vo výške 5 cm. Výsledok bol, že dosah signálu bol iba 20 m. Po zdvihnutí antény do výšky 30 cm od zemi (oblasť 2) sa dosah znova zvýšil.



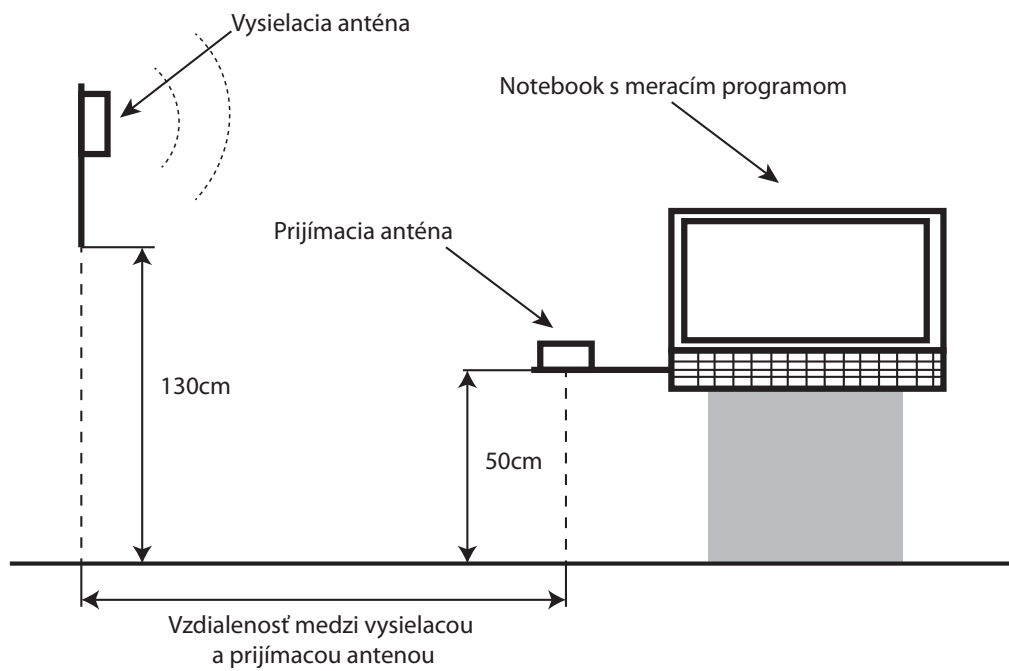
Obr. 4.2: Vplyv polozenia antény na dosah signálu

Druhým miestom bol park v zastavanom území. Nachádzali sa tu stromy a terén nebol rovný. V miestach merania som zachytil 20 Wi-Fi sietí, kde najsilnejšia mala v miestach merania RSSI -75 dBm. Tá vysielala na kanáli 1, rovnako ako rádiový vysielateľ CC2500. Maximálny dosah pri týchto podmienkach a pri najsilnejšom vysielacom výkone +1 dBm bol 44 m.

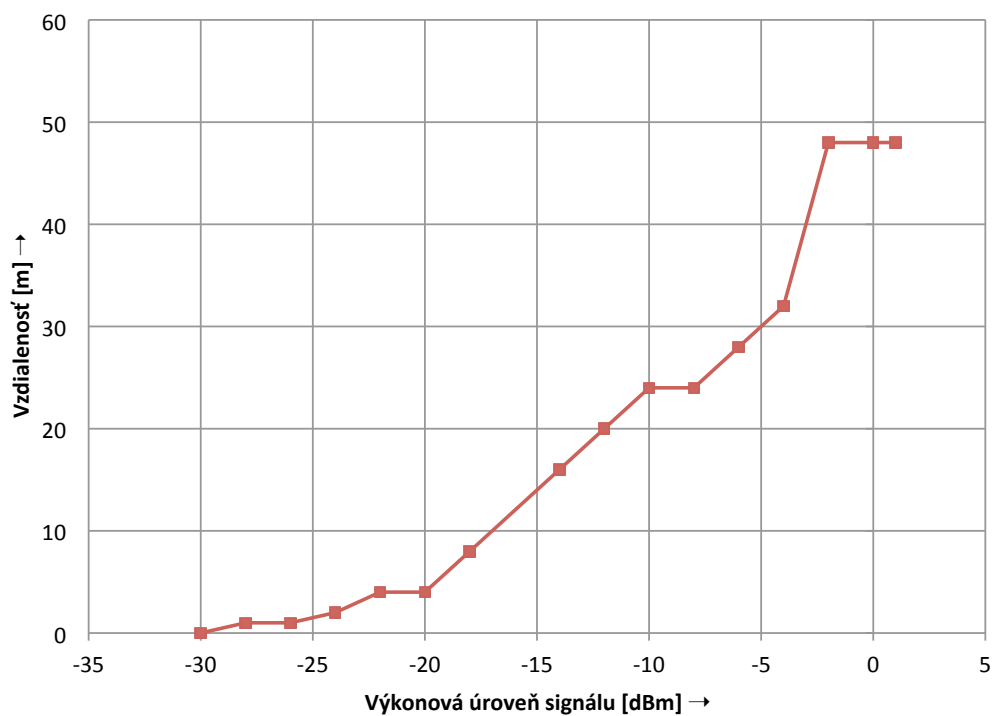
V tomto prostredí bola odmeraná závislosť dosahu signálu na vysielacom výkone vysielateľa. Meralo sa každé 4 metre, pri veľmi krátkom dosahu, teda menej ako 4m, potom každý meter. Prijímacia anténa bola umiestnená vo výške 50 cm, vysielacia anténa vo výške 130 cm. V obrázku č. 4.3 je zobrazený náčrt daného merania.

Pre prehľadnosť je v obrázku č. 4.4 uvedená celková dosiahnutá maximálna vzdialenosť, pri ktorej ešte prebiehala komunikácia medzi vysielateľom a prijímačom.

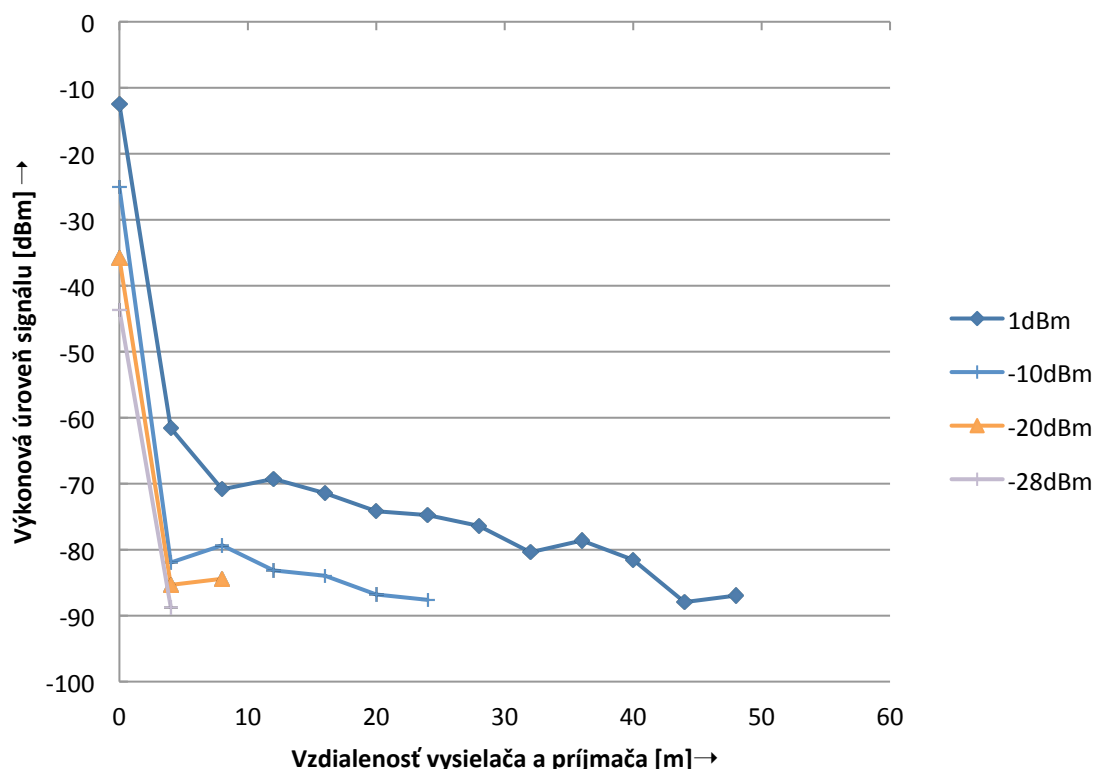
V obrázku č. 4.5 je výsledok celého merania. Dosah signálu sa podľa očakávania znižoval. Najväčší útlm signálu bol pri oddialení vysielateľa od prijímateľa o prvé 4 m, a to až o 50 dBm.



Obr. 4.3: Náčrt merania dosahu signálu pre rôzne vysielacie výkony



Obr. 4.4: Dosiahnutá vzdialenosť pre rôzne vysielacie výkony

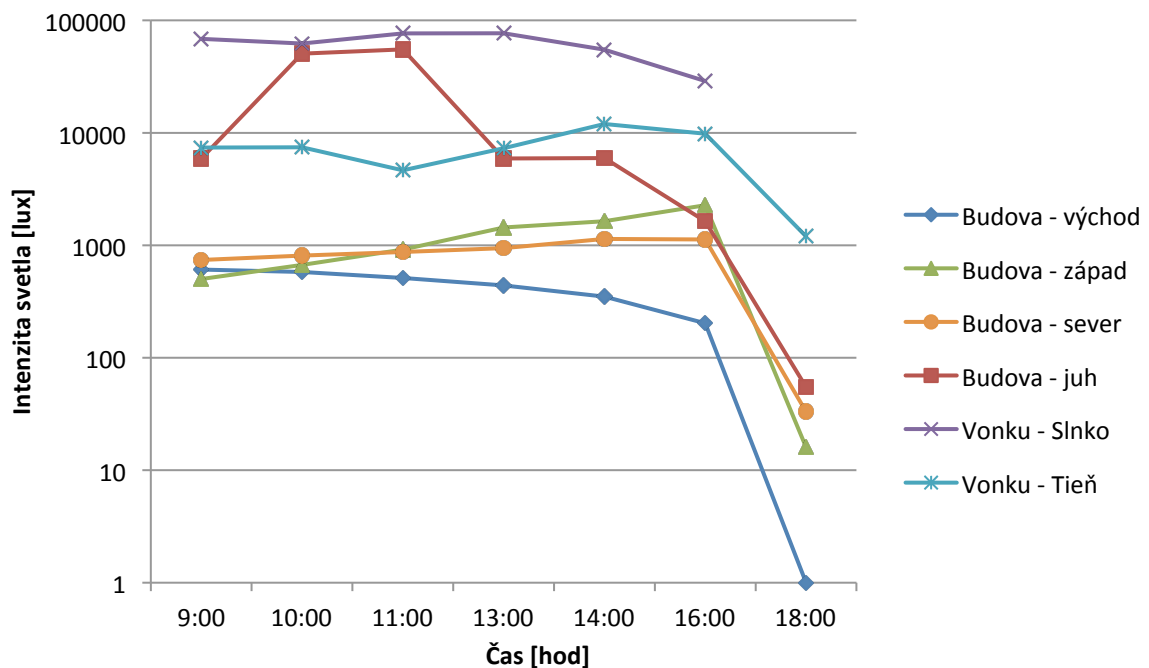


Obr. 4.5: Závislosť dosahu signálu na vysielacom výkone

4.2 Meranie intenzity osvetlenia

Intezita svetla je podstatný faktor pri každej aplikácii, ktorá pracuje s premenou svetelnej energie na elektrickú pomocou solárnych článkov. Intenzita osvetlenia sa mení počas celého dňa, a to rôzne od prostredia. Preto je pri návrhu umiestnenia solárnych článkov rozhodujúca ich poloha. V budovách navyše môže hrať rolu aj umiestnenie solárneho článku na určite svetovej strane, keďže nie na každej svieti Slnko rovnakú dobu a intenzitu. Rovnako je nutné brať v úvahu aj geografickú polohu a dobu svietenia Slnka počas dňa. Bezdrôtový modul eZ430 je navrhnutý na napájanie nízko výkonovým zdrojom, preto je vhodné napájanie pomocou solárneho panelu. Podľa datasheetu potrebuje solárny článok minimálne 200 luxov, k plnému nabíjaniu batérie potom 700 luxov. V tomto meraní je zobrazená intenzita osvetlenia v rôznych častiach obytného priestoru a vo vonkajšom prostredí priamo na slnku a v tieni. Výstupom je možná analýza vhodného umiestnenia solárneho článku.

V obrázku č. 4.6 sú v logaritmickom merítke zobrazené namerané hodnoty. Meranie prebiehalo každú hodinu od 9:00 do 18:00, dňa 23.3, teda období jarnej rovnodennosti. Je možné teda považovať toto meranie za priemernú ročnú hodnotu. Z grafu je vidno, že pri umiestnení modulu vonku je efektívnosť dobíjania zabezpečená počas celého dňa. V budove dopadlo naviac svetelnej energie na južnej strane.



Obr. 4.6: Intenzita osvetlenia v rôznych častiach budovi a vonku

4.3 Charakteristiky solárneho článku

Solárny článok je charakterizovaný jeho účinnosťou. Cieľom tohoto merania bolo zistiť aký výkon dokáže dodávať solárny článok modulu eZ430-RF2500-SEH pri rôznych intenzitách osvetlenia a rôznej záťaži. Od toho sa potom odvíja doba dobíjania batérie.

4.3.1 Lux Voltová charakteristika pri zapojení naprázdno

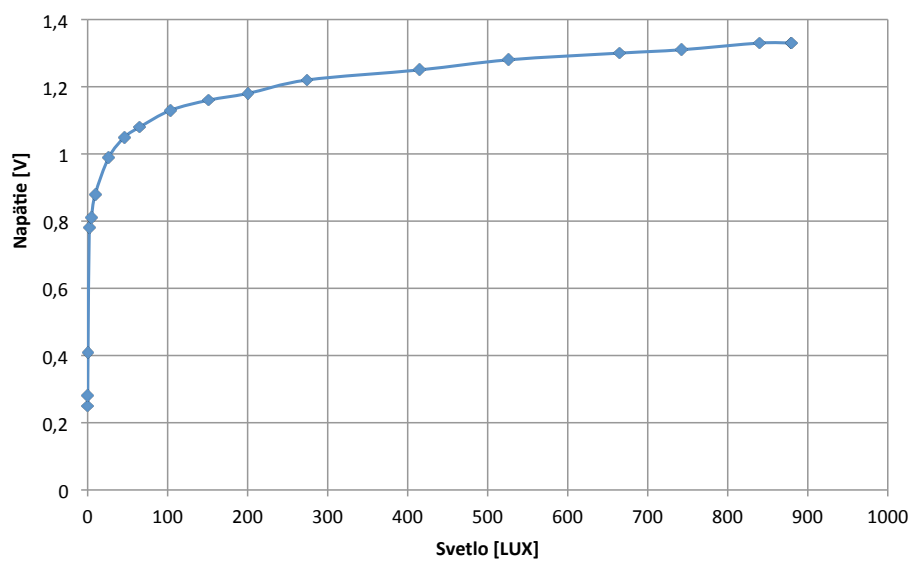
Solárny článok bol umiestnený do krytu, ktorý mal štrbinu s roptylovými fóliami na svetlo. Priamo na výstup solárneho článku bol pripojený voltmeter UNI-T UT33C a vedľa solárneho článku bol umiestnený senzor Lux metra EA33. Energy-Chip™ spolu s batériou bol pri tomto meraní odpojený, meranie teda prebiehalo naprázdno. Ako zdroj svetla slúžila halogénová lampa o výkone 50W, ktorá bola umiestnená 40 cm od solárneho článku. Na obrázku č. 4.7 je zobrazený spôsob merania.

Výstupom tohoto merania je graf na obrázku č. 4.8 zobrazujúci Lux-voltovú charakteristiku solárneho článku,

V zapojení sa nachádzal kondenzátor C1 o veľkosti $22 \mu\text{F}$, ktorý nebolo možné pre účely merania odstrániť. Solárny článok ho začal dobíjať už pri intezite svetla

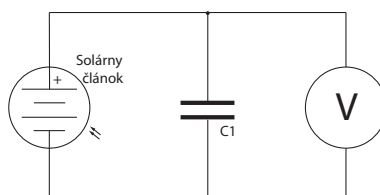


Obr. 4.7: Fotka z merania



Obr. 4.8: Lux Voltová charakteristika solárneho článku v zapojení bez záťaže

0,1 luxov do hodnoty 0,56V. Kondenzátor v zapojení udržuje napätie aj pri vyššej skokovej záťaži.



Obr. 4.9: Schéma zapojenia merania Lux-Voltovej charakteristiky solárneho modulu v zapojení bez záťaže

4.3.2 Výkonová charakteristika pri zapojení so záťažou

Pri štandardnom zapojení je bezdrôtový modul napájaný cez EnerChipTMEH CB5300 podľa zapojenia zobrazeného na obrázku č. 2.2. Ten obsahuje dvojicu paralelne zapojených batérií, u ktorých výrobca deklaruje vstupnú rezistivitu od 750 Ω do 1500 Ω v závislosti od aktuálneho stavu batérií, teda ich dobitia a opotrebovania. Rezistivitu udáva výrobca ako konštantnú od 100% do 10% stavu dobitia. Vnútorň odpor začne výrazne stúpať až pri znížení nabitia batérie pod 10%.

Na grafoch v obrázkoch č. 4.10 a č. 4.11 sú zobrazené výkonové charakteristiky solárneho článku pre rôzne hodnoty rezistivity. Hodnoty rezistorov boli volené podľa hodnôt rezistivity batérií EnerChipuTMCBC050 v závislosti od jeho opotrebovania.

Ak vezmeme maximálnu hodnotu rezistivity EnerChipTM-u 1500 Ω (v meraní mu zodpovedá hodnota 1493 Ω) je z grafu zrejmé, že dodáva v oblasti 700 lux výkon 322 μ W pri prúde 465 μ A.

Pri takomto dodávaní prúdu by teda nabitie batérie trvalo 12,6 minút, podľa nasledujúceho výpočtu.

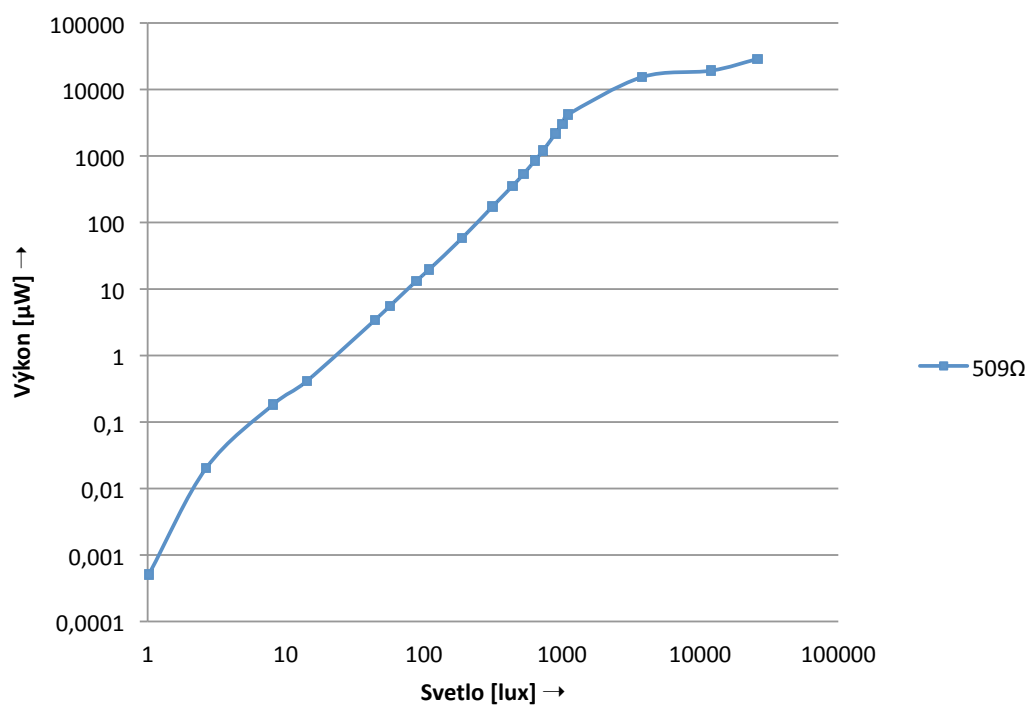
Kapacita batérií: 100 μ Ah

Solárny článok dodáva: 465 μ A

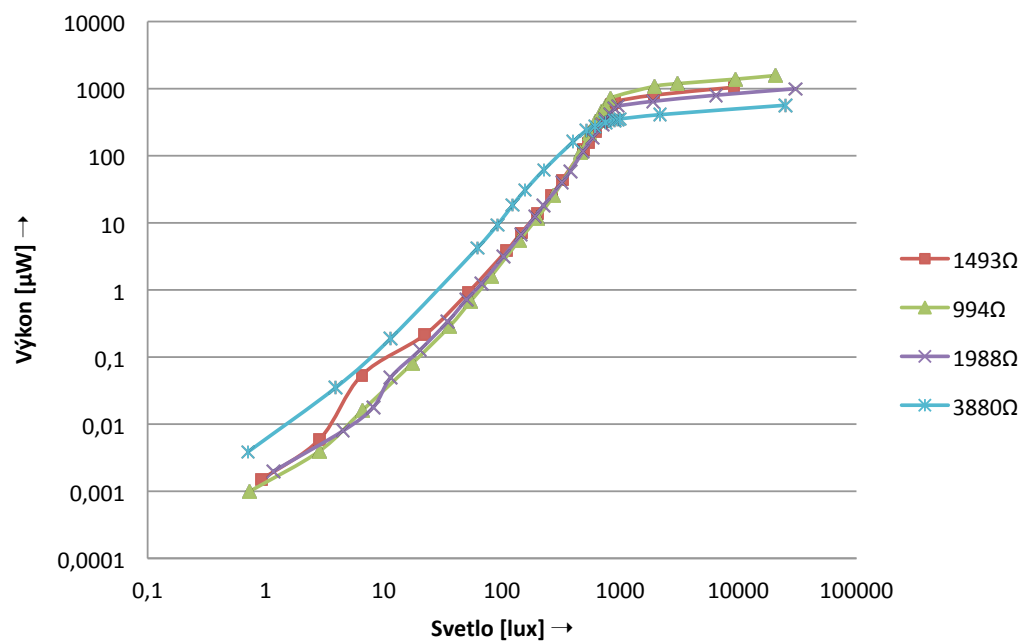
Doba dobíjania t 100 μ Ah batérie:

$$t = \frac{\text{Kapacita batérie}}{\text{Nabíjací prúd}} = \frac{100 \mu\text{Ah}}{465 \mu\text{A}} = 0,21 \text{ hodín} \Rightarrow 12,6 \text{ minút} \quad (4.1)$$

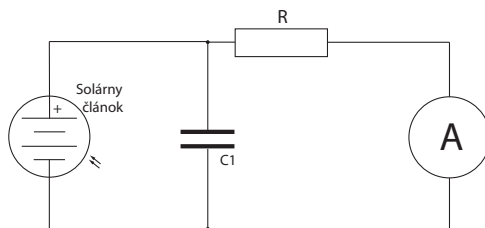
Vstupný odpor EnerChipTM-u je ale vyšší. Reálne bolo nameraných 13,6 k Ω . Pri rezistore o veľkosti 15 k Ω bol pri 798 luxoch dodávaný prúd 124 μ A. Pri takomto prúde je potom doba trvania dobíjania 100 μ Ah 48 minút. Táto hodnota zodpovedá hodnotám datasheetu, kde je uvedená doba dobíjania plnej kapacity batérie 1 hodina.



Obr. 4.10: Výkonová charakteristika solárneho článku pre 509Ω



Obr. 4.11: Výkonová charakteristika solárneho článku pre ďalšie rezistivity



Obr. 4.12: Schéma zapojenia merania výkonovej charakteristiky solárneho modulu so záťažou

4.4 Počet odoslaných paketov v závislosti na vysielacom výkone vysielача

V dodávanej aplikácii je obmedzený počet vysielania paketov o veľkosti 20 bajtov bez dostatočného osvetlenia na 400 paketov. Pre nasledujúce meranie bolo toto obmedzenie odstránené, a tak bolo možné zistiť reálny počet odoslaných paketov v závislosti na nastavenom vysielacom výkone antény vysielача. Ten podľa tabulky č. 2.4 môže byť nastavený od +1 dBm do -30 dBm, teda spotreba od 21,5 mA do 9,9 mA. Rýchlosť prenosu dát bola nastavená na 250 kBaud.

Proces merania bol vždy nasledovný:

- Nabíjanie batérie konštantným svetlom 3000 luxov po dobu 1 hodiny.
- Vysielanie paketov každú sekundu so zablokovaním nabíjania batérie po dobu ukončenia vysielania paketov.

Meranie bolo vykonané 3x a spriemerované. Výsledok je uvedený v grafe na obrázku č. 4.13. Charakteristika nie je lineárna. Pri vysielacom výkone -12 dBm bolo možné odoslať viac paketov ako pri nižších vysielacích výkonoch. To zodpovedá aj tabuľkovému odberu prúdu, ktorý je pri tejto hodnote nižší ako pre okolité hodnoty vysielaného výkonu.

V tabuľke č. 4.2 je uvedený teoretický výpočet možného počtu odoslaných paketov. Výrobca uvádza, že odoslanie jedného paketu o veľkosti 20 bajtov je 20 ms. Výpočet je nasledujúci:

Pre vysielací výkon -12 dBm je spotreba 11,1 mA.

$$11,1\text{mA} \times 20\text{ms} = 222\text{ }\mu\text{As} \Rightarrow 0,061\text{ }\mu\text{Ah}$$

Výpočet možných odoslaných paketov

Kapacita batérie / spotreba vyslania jedného paketu = počet odoslaných paketov

$$100\text{ }\mu\text{Ah} / 0,061\text{ }\mu\text{Ah} = 1622\text{ paketov}$$

Tieto hodnoty sa ale pri reálnom meraní pri vysielacom výkone väčšom ako -10 dBm nepotvrdili a bolo možné odoslať paketov viac.

Tab. 4.1: Čas možného odosielania paketov pre jednotlivé vysielacie výkony

Vysielací výkon [dBm]	Počet odoslaných paketov [-]	Frekvencia odosielanie paketu			
		1 sekundu [hod]	5 sekúnd [hod]	1 minutu [hod]	4 minuty [hod]
1	1519	0,42	2,11	25,32	101,27
0	1632	0,45	2,27	27,20	108,80
-2	1780	0,49	2,47	29,67	118,67
-4	1799	0,50	2,50	29,98	119,93
-6	1832	0,51	2,54	30,53	122,13
-8	1842	0,51	2,56	30,70	122,80
-10	1785	0,50	2,48	29,75	119,00
-12	1766	0,49	2,45	29,43	117,73
-14	1796	0,50	2,49	29,93	119,73
-16	1857	0,52	2,58	30,95	123,80
-18	1849	0,51	2,57	30,82	123,27
-20	1830	0,51	2,54	30,50	122,00
-22	1894	0,53	2,63	31,57	126,27
-24	1917	0,53	2,66	31,95	127,80
-28	1955	0,54	2,72	32,58	130,33
-30	1929	0,54	2,68	32,15	128,60

Dosiahnutý počet vyslaných paketov je dostatočný v prípade, že sa nastaví interval vysielania dlhší. Pri vysielaní každú minutu je takto možné vysielat 25 hodín bez nabíjania.

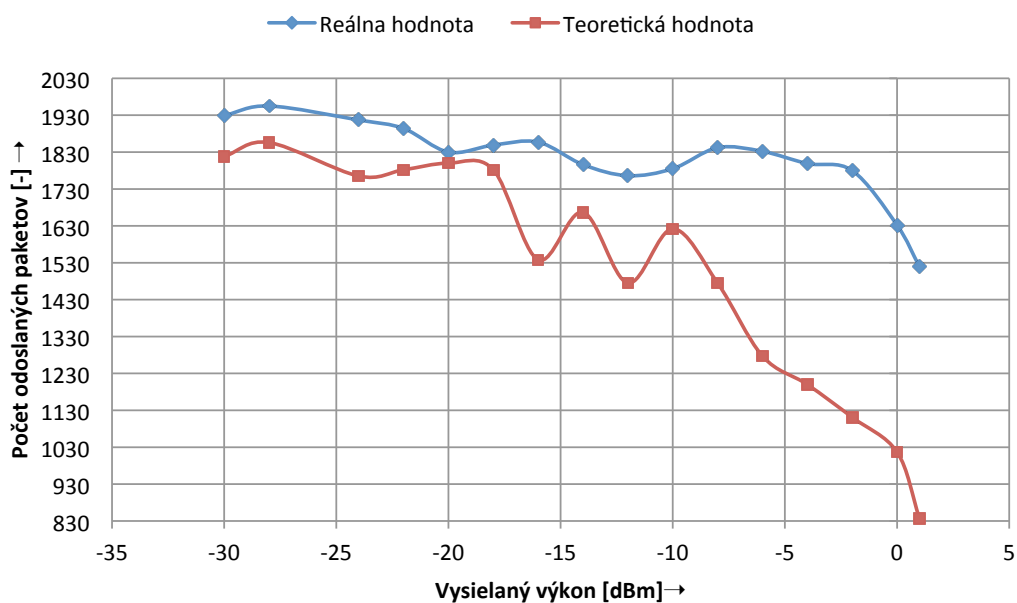
Z predchádzajúcich výpočtov o dobíjaní akumulátorov zo solárneho článku vyplýva, že stačí aby bol solárny článok osvetlený svetlom silnejším ako 700 luxov po dobu 48 minút k plnému nabitíu batérií. Táto doba sa predlžuje ak sa počas dobíjania zároveň aj vysielajú. Napríklad pri vysielaní každú 1 minútu výkonom -12 dBm a dobe nabíjania uvedenú v kapitole 4.3.2 pre 13,6 kΩ by bola situácia nasledovná: Doba nabíjania bez vysielania: 48 minút

Celková spotreba vysielania za 48 minút: $48 \times 222 \mu\text{As}$ (spotreba na vyslanie jedného paketu) = $2,96 \mu\text{Ah}$

Dobíjanie $2,96 \mu\text{Ah}$ by predĺžilo dobíjanie o 86 sekúnd (viz výpočet v kapitole 4.3.2). Solárny článok je schopný dodávať energiu už od jednotiek luxov, preto k dobíjaniu dochádza prakticky celú dobu dňa.

Tab. 4.2: Výpočet možného počtu odoslaných paketov

Vysielací výkon	Odoberaný prúd	Spotreba na vyslanie jedného paketu (20ms)	Spotreba	Možný počet odoslaných paketov z plne nabitých batérií
[dBm]	[mA]	[μ As]	[μ Ah]	[-]
-30	9,9	198	0,06	1818
-28	9,7	194	0,05	1856
-26	10,2	204	0,06	1765
-24	10,1	202	0,06	1782
-22	10	200	0,06	1800
-20	10,1	202	0,06	1782
-18	11,7	234	0,07	1538
-16	10,8	216	0,06	1667
-14	12,2	244	0,07	1475
-12	11,1	222	0,06	1622
-10	12,2	244	0,07	1475
-8	14,1	282	0,08	1277
-6	15	300	0,08	1200
-4	16,2	324	0,09	1111
-2	17,7	354	0,10	1017
0	21,2	424	0,12	849
1	21,5	430	0,12	837



Obr. 4.13: Počet odoslaných paketov pre rôzne vysielacie výkony

5 ZÁVER

V bakalárskej práci bola zhrnutá problematika napájania bezdrôtových senzorných sietí pomocou solárnej energie. S vývojovým kitom od spoločnosti Texas Instruments eZ430-RF2500-SEH bol spravený výzkum spotreby energie, výkonu solárneho článku a podmienok pre umiestnenie bezdrôtových modulov.

Analýza spotreby mikroprocesoru MSP430 a bezdrôtového modulu eZ430 bola spracovaná na základe dokumentov, ktoré poskytol ich výrobca. Meranie dodávaného prúdu solárnym panelom bolo odmerané pri rôznych intenzitách osvetlenia a rôznou záťažou. V práci je tiež spracovaná problematika batérií, a to ako klasických s tekutým elektrolytom, tak batérií polovodičových Solid-State s pevným elektrolytom. Tie boli využité pri meraní. Hlavným prínosom práce je analýza počtu odoslaných paketov v závislosti na výkone vysielача.

Výsledok merania je, že pri intervale vysielania každú minútu dokáže skúmaný solárny článok zabezpečiť dostatok energie na vysielanie bez prerušenia, a to aj za horších svetelných podmienok (od intenzity osvetlenia 700 luxov, čo predstavuje osvetlenie v bežnej miestnosti). Kapacita použitého akumulátora bola dostatočná pre vysielanie takmer 2000 paketov o veľkosti 20 bajtov. Na plné nabitie batérie potom stačí hodina nabíjania denne.

LITERATÚRA

- [1] Texas Instruments, Incorporated [SWRS040,C]. *MSP430F22x2, MSP430F22x4 Mixed Signal Microcontroller* (Rev. F) [online]. [s.l.] : [s.n.], 25. 11. 2011 [cit. 2011-11-26]. 25 s. Dostupné z WWW: <<http://www.ti.com/lit/ug/slau273c/slau273c.pdf>>.
- [2] Texas Instruments, Incorporated [SLAU273,C]. *eZ430-RF2500-SEH Development Tool User Guide* [online]. [s.l.] : [s.n.], 20. 5. 2010 [cit. 2011-11-26]. 94 s. Dostupné z WWW: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f2274.pdf>>.
- [3] Texas Instruments, Incorporated [SWRS040,C]. *Low-Cost Low-Power 2.4 GHz RF Transceiver* (Rev. C) [online]. [s.l.] : [s.n.], 24. 2. 2011 [cit. 2011-11-26]. 96 s. Dostupné z WWW: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2500.pdf>>.
- [4] HLAVINKA, Standa. *Nabíjecí články a baterie* [online]. [cit. 2012-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.skyfly.cz/pristroj/baterky02.htm>>.
- [5] MPOWERUK. *Battery Performance Characteristics* [online]. [cit. 2012-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.mpoweruk.com/performance.htm>>
- [6] Bulletin. *The state of solid-state batteries* [online]. [cit. 2012-05-27]. Dostupné z WWW: <http://americanceramicsociety.org/bulletin/2012_pdf_files/mar_12/pdf/mar12_lo-res.pdf>
- [7] RFMUSER *Sizing Solar Energy Harvesters for Wireless Sensor Networks*. [online]. s. 11 [cit. 2012-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.rfm.com/products/apnotes/anm1002.pdf>>
- [8] SONYO *SANYO Amorphous Solar Cell AM-1437* [online]. s. 2 [cit. 2012-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.farnell.com/datasheets/87122.pdf>>
- [9] SONYO *SANYO Amorphous Solar Cell AM-5308CAR* [online]. s. 2 [cit. 2012-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.farnell.com/datasheets/87125.pdf>>
- [10] SONYO *SANYO Amorphous Solar Cell AM-1815* [online]. s. 2 [cit. 2012-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.farnell.com/datasheets/87124.pdf>>
- [11] CYMBET *EnerChip CBC050* [online]. s. 4 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.cymbet.com/pdfs/DS-72-01.pdf>>